講 演
 Lecture

サブソルト地震探査の最新技術動向*

青木 直史**・新部 貴夫**・高梨 将***

(Received September 4, 2013 ; accepted November 6, 2013)

Recent seismic technologies for sub-salt exploration

Naoshi Aoki, Takao Nibe and Mamoru Takanashi

Abstract : As the deep water drilling technology continues to evolve, sub-salt basins has become one of the most prospective targets for hydrocarbon reserves. Even though sub-salt is a difficult target for seismic imaging, various advanced technologies have been developed in the last decade and difficulties encountered in the new prospect have been reduced. New seismic acquisition technologies such as broadband seismic, full-azimuth and ultra-long offset acquisition mitigate the problems from the presence of salt. Sub-salt imaging techniques has also evolved with the aid of the advanced new acquisition technology, high oil price, and low cost high performance computing (HPC). Anisotropic RTM has become a usual technique in the Gulf of Mexico, and FWI grows in use and popularity nowadays.

Keywords : sub-salt, full-azimuth and long-offset, Anisotropic RTM, MVA, FWI

1. はじめに

大水深掘削技術の進展を受けて大水深域でのサブソルト探鉱が注目される地域がある。米国領メキシコ湾は巨大な岩塩堆積盆であり、深海域では中生代（主にジュラ紀）に堆積した岩塩層の滑動によって、広範な褶曲構造とともに岩塩ダイアピルに伴う複雑な構造が形成され、様々なタイプのトラップが成立している。深海域での原油生産は 1979 年に開始され、90 年代半ばから 2000 年頃にかけて大きく拡大し、現在は生産量の 2/3 以上が深海域からもたらされている（伊原，2009）。メキシコ湾の主要貯留層は中新統（Miocene）以浅の地層であるが、米国 Chevron 社は 2006 年、水深 7,000 フィート（2,134 m）で深度 2 万 8,175 フィート（8,588 m）を掘削したジャック 2 号井において、日量 6,000 バレル以上の出油に成功している（佐藤，2007）。発見された貯留層は古第三系のタービダイト砂岩層（Wilcox 層）であり、岩塩シートやキャノピーに覆われながらメキシコ湾の大水深・大深度域の広範囲に広がると思われる、巨大油田を狙ったサブソルトブレイに期待が寄

せられている。すでにいくつもの探掘井が掘削されており、サブソルトの 3-way 構造における炭化水素のトラップを狙ったチャレンジなども果敢に行われている。

ブラジル沖、西アフリカ沖の大水深域も岩塩構造が発達する地域であり、近年熱く注目されている地域である。ブラジルの PETROBRAS は 2007 年、リオデジャネイロ沖合 250 km に位置するサントス堆積盆 BM-S-11 鉱区のプレソルトで、可採埋蔵量が原油換算で 50~80 億バレルに及ぶ Tupi 油ガス田を発見した（船木，2011）。プレソルトは一躍注目される探鉱対象となり、その後ブラジル沖では相次ぐ発見が報告されている。ブラジル沖と似通った地質的特長を持つ西アフリカ沖においても、米国 Cobalt 社により 2012 年に Kwanza 盆地 Block 21 の Cameia-1（水深 1,680 m）において層厚 274 m のプレソルトの油層が発見され、テストでは原油 5,010 バレル / 日、ガス 14,320 Mcfd が得られている（竹原，2012）。

活発化する大水深サブソルト・プレソルト探鉱を背景に、地震探査においては数々の最新技術が投入されている。本稿では、近年注目されるサブソルト探鉱に資する地震探査技術の最新技術動向をまとめる。まず岩塩層の特徴と地震探査によるサブソルト貯留層把握における問題点を整理したうえで、地震探査技術の最新技術として、Full azimuth & Long offset 化が進むデータ取得技術と、高精度化が進むマイグレーションおよび速度モデル構築技術について紹介する。

* 平成 25 年 6 月 27 日平成 25 年度春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「課題は果たされたのか？ー物理探査技術の現況と将来ー」にて講演 This paper was presented at the 2013 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Geophysical Exploration Technology, Present Status and Next Generation" held in Tokyo, Japan, on June 27, 2013.

** 株式会社地球科学総合研究所 JGI, Inc.

*** (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

2. 岩塩層の特徴とサブソルト貯留層把握の問題点

岩塩は陸地内に封じ込められた塩水が蒸発することによって形成される蒸発岩であり、世界中の多くの堆積盆地に存在している。力学的にはとても弱い物質であり、荷重を受けると塑性変形が生じる性質がある。古い時代に堆積した岩塩層は、上位層の堆積や地殻変動によって流動変形し、複雑な岩塩構造を形成する (e.g. Hudec and Jackson, 2007; Fossen, 2010)。物理的には、他の堆積岩類と比較して、弾性波速度が速く、密度が小さく、比抵抗は高いといった特徴を持つ。

岩塩層構造を分類すると、岩塩が堆積場所から移動していない原地性 (autochthonous) のものと、堆積後に流動して側方または上方へ大きく移動した異地性 (allochthonous) のものに分けられる。多くの場合、深部の古い時代の岩塩が浅部の新しい時代の堆積層の方へ移動する。メキシコ湾では、新第三紀の堆積盆地に、深部の古い時代 (ジュラ紀) に堆積した岩塩が流動した異地性のソルトシートがよく見られる。この場合、周辺の若い時代の地層は、岩塩に比べて弾性波速度が大変小さい。

異地性岩塩の場合、厚さが3~5 kmに及ぶソルトシートを形成することがある。一見して巨大な塊のように見えるが、流動する岩塩が互いに衝突し融合した場合や、岩塩が周囲の堆積層を取り込んだ場合には、内部に顕著な不均質構造を持つことがある。このような岩塩層は Dirty Salt と呼ばれる (Leveille *et al.*, 2011; Ji *et al.*, 2011)。

岩塩層は反射法地震探査のイメージングの劣化を引き起こす原因として知られるが、全ての岩塩層がその様な問題を引き起こすわけではない。大きな流動変形を伴わない原地性の岩塩層の場合、その上下の地層は同時期に堆積した岩石である。音響インピーダンスコントラストは比較的小さくおおむね10%以下とされる。この場合、サブソルト貯留層のイメージングに岩塩層は深刻な影響を及ぼさない。サブソルトに関して問題が生じているのは、主に異地性岩塩構造においてであり、問題点は以下にまとめられる。

(1) サブソルトへ透過する震源エネルギーの不足

海底面近くまで上昇した岩塩層と周辺堆積層のインピーダンスコントラストが大きくなると臨界角は20~30度 ($V_{p, \text{sediment}}=1600\text{--}2000\text{ m/s}$, $V_{p, \text{salt}}=4000\text{--}4500\text{ m/s}$ の場合) まで小さくなり、震源エネルギーの大部分が岩塩層の上面で反射されてしまう。更に岩塩層上面の複雑な形状や岩塩層内の不均質構造は散乱・減衰・多重反射を引き起こし、震源エネルギーの透過を阻害する。

(2) 不均一なサブソルトのイルミネーション

岩塩層における地震波の攪乱により、下位の地層に対する地震波イルミネーションは不均一になる (Michell *et al.*, 2007)。特に岩塩層の陰となる部分はシャドウゾーンと呼ばれ、イメージングに利用可能な反射波を取得できず地質状況の把握が困難な領域となる。

(3) 速度場の複雑さ

高精度イメージング手法である重合前深度マイグレーション

ション (pre-stack depth migration, PSDM) には、速度構造が詳細に記述されたモデルが必要である。しかしながら、複雑な岩塩構造でこれを正確に推定することは一般に困難が伴う。さらに地震波速度の異方性を正しく取り扱わなかった場合、岩塩構造におけるトラップ位置やホライゾン深度の誤差が大きくなるなどの問題が生じる (Jones, 2010)。

以上の3つの問題に対し、さまざまな解決策が提示されている。まず(1)のサブソルトへ透過する震源エネルギーの不足の問題に対しては、本誌の西部ほか (2014) において解説した広帯域化技術が問題の緩和に役立つと考えられる。現在の最新技術では、透過性に優れる低周波数側は2.5 Hz 付近から有効なデータが取得されている。一方、(2)の不均一イルミネーションと、(3)の速度場の複雑さに関する問題に対しては、以降で解説する Full azimuth & Long offset データ取得と、高精度化されたマイグレーションおよび速度モデル構築技術の適用が、サブソルト記録の改善に貢献するところが大きい。

3. Full azimuth & Long offset データ取得

サブソルト地震探査においては岩塩層に起因するシャドウゾーンの低減が特に重要となる。海上3D地震探査データ取得では、曳航するストリーマケーブルの幅によって発振点-受振点の方位角 (Azimuth) が制限されるため、従来の Narrow-Azimuth (NAZ) 法と呼ばれる調査法では岩塩層での三次元的な波動場の擾乱の影響を受けやすく、適正なサブソルトのイルミネーションを得ることができない。シャドウゾーンの低減には多様な方位角-オフセット分布を持つ Full azimuth & Long offset データの取得が望ましい。

近年の海上ストリーマー調査においては、方位角-オフセット分布を改善させるための方法が多数提案されている。その代表的な手法をまとめた概略図を図1に示す。

Dual-Azimuth (DAZ) 法 (e.g. O'Connell *et al.*, 1993; Campbell *et al.*, 2002; Ray and Chen, 2004; Mitchel *et al.*, 2006) や、Multi-Azimuth (MAZ) 法 (e.g. Reksnes *et al.*, 2002; Barley and Summers, 2007) は、同一調査エリアでセイルライン方向が異なる複数のデータセットを取得することで、方位角-オフセット分布を改善させる。これらは NAZ 法と同様に1隻の調査船でデータを取得できるほか、既往の三次元データセットに方位角が異なるセイルラインを持つデータセットを追加するといった利用法が見られる。

Wide-Azimuth (WAZ) 法 (e.g. Barley and Summers, 2007; Kapoor *et al.*, 2007; Keggin *et al.*, 2007; Fromyr *et al.*, 2008; Buia *et al.*, 2008) は多船方式によって各調査における方位角の幅を広げるとともに、データ取得効率を改善した手法である。方式には複数の発振船がストリーマー船の周囲に配備されるもののほか、ストリーマー船も複数使用される場合がある。Rich-Azimuth (RAZ) 法 (e.g. Kapoor *et al.*, 2007; Howard *et al.*, 2007a, b) は MAZ 法と WAZ 法を組み

図1 方位角-オフセット分布改善を目的とする海上ストリーマー調査方式の例。従来法を示すNAZに対し、その他方式では方位角とオフセット分布の改善が図られている

合わせた方式を採用する。この技術の登場により方位角-オフセット分布において抜けのないデータ取得が可能となった。2012年に発表されたStagSeisと呼ばれる方式では、オフセット10 kmまでのフルアジマス・カバレッジと、2つのセイルライン方向についての最大オフセット20 kmを同時獲得が達成されている (CGG website; Mothi, 2013)。

Coil Shooting法 (e.g. Buia *et al.*, 2008; Moldoveanu and Kapoor, 2008; Hill *et al.*, 2009; Moldoveanu and Quigley, 2011) は Full-Azimuth (FAZ) 法とも呼ばれ、コイル状の航路により発受振することで、ストリーマー船1隻で均質な方位角-オフセット分布を得ることができる。ラインチェンジに伴うタイムロスがなくデータ取得の効率がよい。そして多船方式のDual Coil Shooting法 (Brice, 2011; Espinoza *et al.*, 2011) ではケーブル長を超える>10 kmのUltra-long offsetデータ取得が可能であり、メキシコ湾での大水深・大深度探鉱に対応している。

4. マイグレーション技術の高精度化

岩塩構造を対象とするマイグレーション処理にはPSDMが一般的に用いられている。アルゴリズムにはいくつかの種類があり、まず波線に基づく手法 (ray-based method) と波動方程式に基づく手法 (wave-equation-based method) に大別される。波線に基づく手法は比較的計算コストが低く、その代表的手法であるキルヒホッフ・マイグレーション (Kirchhoff migration) は90年代に商用化されると

広く普及した。2000年代には波動方程式マイグレーション (wave equation migration, WEM) もよく用いられるようになる。この手法は地表で観測された波動場全体を深度方向に伝播させることで地下の構造を復元する方式を採用する。これら2つの手法にはそれぞれアルゴリズム上の制約があり、複雑な岩塩構造の下位を十分にはイメージできない場合があった。図2はこれら従来手法におい

Multi-path: 異なる経路による同一地点からの反射波が含まれる状況

Two-way propagation: 地表(反射点)から反射点(地表)までの経路で伝播の向きが変わる状況。(e.g. プリズム反射波, 多重反射波)

Turned wave: Two-way propagationの1ケース

(Jones, 2010 を参考に作成)

図2 従来手法において問題となる波動伝播状況

て問題となる波動伝播状況の例を示す。マルチパス (Multi-path) は 1 組の発振点・受振点の記録において、同一地点からの反射波が複数の時刻で観測される現象であり、同一地点からの反射波が異なる経路を通過してきた状況が想定される。一般的なキルヒホッフ・マイグレーションでは 1 つのパスのみしか考慮されない。Turned wave は波線の鉛直方向の向きが伝播の過程で変わる波動を指し、この波の利用はオーバーハングを伴う急傾斜構造のイメージングにおいて重要である。One-way 型の WEM は Turned wave をイメージングに利用できない。Two-way propagation は多重反射や屈折によって波の進行方向が逆転する状況を指し、Turned wave もこの一種と見做される。一般的なキルヒホッフ・マイグレーションや One-way 型の WEM は、Two-way propagation の状況に対応していない。

近年、サブソルト貯留層のイメージングにおいては以下に挙げる 2 つの手法の利用が拡大している。これらは従来手法の欠点を克服した高精度なマイグレーション手法である。

4.1 Reverses Time Migration

1982 年に McMechan によって提案された Reverses Time Migration (RTM) は、発振点からの波は順時間方向に伝播させ、受振点で観測された波動場を逆時間方向に伝播させ、両者の波動場についてイメージングコンディショ

ン (imaging condition) を適用して最終的なマイグレーション結果を得るというアルゴリズムを持つ (McMechan, 1983)。これにより上述の問題全てに対応するが、石油探鉱フィールドスケールの三次元データに対しての適用は計算コストが膨大すぎたことから永らく実用化には至らなかった。しかしながら 2000 年代の原油価格の高止まりや High Performance Computing (HPC) 技術の進展により、RTM を取り巻く経済的・技術的障壁が緩和されたことで、現在 RTM の利用が拡大している。

4.2 Beam Migration

波線ベースのマイグレーション手法にも品質の向上が見られる。Beam Migration (BM) は一定幅の平面波として射出されたビームを想定し、局所スラントスタック (local slant stack) により τ - p 領域に変換された入力データの振幅を、対応する水平スローネス p と走時 τ を持つ波面にマッピングする (Vinje *et al.*, 2008)。このアルゴリズムにより、キルヒホッフ・マイグレーションの長所が継承されたうえで、マルチパスへの対応が実現し、局所スラントスタックにより S/N 比が改善され、イメージポイントに限定されるマッピングにより低マイグレーションノイズが獲得されている。

4.3 異方性への対応

岩石には方向によって岩石中を進む地震波伝播速度が異

(JGI 内部資料)

図 3 模式図による水平等方系異方性の分類：(a) Vertical Transverse Isotropic (VTI) 媒質、(b) Horizontal Transverse Isotropic (HTI) 媒質、(c) Tilted Transverse Isotropic (TTI) 媒質

表 1 異方性の分類

対称系	独立な剛性係数の数	内 容	地質的条件
三斜晶系 Triclinic	21	非常に複雑。地震探査での取り扱いが困難	互いに直交しない複雑なフラクチャー
単斜晶系 Monoclinic	13	3つの対称面のうち2つが互いに直交しない。残りの1つは鏡像対称面	互いに直交しない2つの鉛直フラクチャーと水平なレイヤリング
斜方晶系 Orthorhombic	9	直交する3つの鏡像対称面	水平なレイヤリングと鉛直フラクチャー、または互いに直交する2つの鉛直フラクチャー
水平等方系 Transversely isotropic (TI)	5	1つの回転対称軸	薄層の重なりや頁岩の積層。フラクチャーや低アスペクト比の孔隙の並び
等方系 Isotropic	2	岩石物性は方向に依らず一定	厚い岩塩、緻密な砂岩や炭酸塩岩

(JGI 内部資料)

図4 商用のPSDMにおける異方性への対応状況

なる異方性があり、反射法地震探査においては、およそオフセット距離が対象深度の2倍以上になると、異方性の影響が顕著に現れてくる。マイグレーション処理においては異方性への対応が1つの重要な課題となっている。

自然界の岩石には、複雑さの程度が異なるいくつかの異方性が見られる。応力と歪の関係式（フックの法則）における $6 \times 6 = 36$ 個の要素からなる剛性テンソルの対称性により複雑さが決まる。剛性テンソルが高次の対称性を有し独立な係数の数が少ないほど単純な異方性となり、対称性が低く独立な係数が多いほど岩石は多くの対称面を持つ複雑な異方性を示す。代表的な異方性の種類を表1に示す。系の複雑さは「三斜晶系 (Triclinic) → 単斜晶系 (Monoclinic) → 斜方晶系 (Orthorhombic) → 水平等方系 (Transversely Isotropic) → 等方系 (Isotropic)」の順に下がる。最後の等方系を除くと、地震探査で捉えられる異方性は単斜晶系から水平等方系とされる。図3は水平等方系異方性の分類を模式的に示したものである。

図4は商用のPSDMにおける異方性への対応状況が示されており、現在はRTMにおいても傾斜した水平等方系異方性 (TTI) に対応可能であることが示されている。

5. 速度モデル構築技術の高精度化

5.1 MVA

深度マイグレーション処理は与える速度モデルに結果が大きく依存することから、精度の高い速度モデル構築技術が要求される。反射トモグラフィーは90年代に登場した代表的なMVA手法であり、残差ムーブアウト (Residual Moveout, RMO) のピッキングによる読み取り値と、反射イベントからの波線追跡による計算走時との誤差が最小化

されるまで速度モデルの更新を繰り返し行って速度分布を推定する (Woodward *et al.*, 2008)。本手法は現在も広く用いられているが、解析精度には90年代のそれと比べて大きな向上が見られる。本手法が登場した当時のモデルのグリッド間隔は空間方向数km、深度方向で500m程度であったが、現在は空間・深度方向ともに数百m程度のグリッド間隔を持ち高密度化されている。解析では自動ピック機能を利用して大量のRMO読み取りデータが使用されている。RMOを近似するための曲線について、かつては放物線や双曲線など単一パラメータで表現される関数が使用されていたが、現在は複数パラメータもしくは多項式近似も選択可能である (5.2 異方性モデル参照)。またマルチアジマスデータのMVAは、方位毎の解析では短波長の速度不均質性と異方性の影響を分離できないため、全方位角のデータを用いた同時解析が為される場合がある。以上の精度改善は演算量の大幅な増加が伴うが、数百のCPUを用いた並列計算により実現されている。

5.2 異方性モデル

(1) モデルの記述

Thomsen (1986) は、水平等方系 (TI) 異方性媒質について対称軸方向のP波速度 (V_{P0}) とS波速度 (V_{S0})、異方性の強さを示す3つの無次元量 (ϵ , γ , δ) を用いて異方性を表現することを提唱した。3つの異方性パラメータの性質は次のとおりである：

ϵ : P波の異方性の強さを表す,

γ : SH波の異方性の強さを表す,

δ : 対称軸におけるP波速度関数の曲率を表す (Grechka, 2009)。P波速度とSV波速度の対象軸に対する方向変化を支配する (Tsvankin *et al.*, 2010)。

この表現方法により、“異方性の強さ”を、剛性テンソルの組み合わせからなる異方性パラメータとP波およびS波の速度によって簡便に表せるようになった。異方性が弱い場合 (weak anisotropy: $\varepsilon, \gamma, \delta$ の絶対値が1より十分小さい場合)、方向に依存する波の伝播速度は、上記の異方性パラメータについて線形な関係式で近似表現できる。現在構築されているPSDMのための速度モデルの多くが、P波速度に関わる異方性パラメータ ε と δ を含む異方性モデルとなっている。

補正対象となる異方性のタイプに関して、従来は水平成層を仮定したVTI (Vertical Transverse Isotropy) への対応で済まされていたが、ワイドアジマスデータの一般化に伴って地層傾斜による速度の方位依存性の問題が顕在化した。近年は地層の傾斜を考慮したTilted Transverse Isotropy (TTI) や垂直方向のフラクチャーを表現可能なHorizontal Transverse Isotropy (HTI) への対応がある程度可能となっている。なお重合前時間マイグレーションなどの時間領域の処理においては、Alkhalifah and Tsvankin (1995) が導入した、 ε と δ によって決まる非楕円性パラメータ η (anelliptical parameter) を用いる方式が主流となっている。

(2) パラメータ推定

異方性パラメータ解析では、反射法データ、坑井データ、構造解析などを組み合わせて、適切な速度モデルを構築することが重要である。

異方性パラメータのうち、 δ についてはVSPにより推定することができる。 η についてはロングオフセット領域のデータを含むWalkaway VSP (Grechka and Mateeva, 2007) もしくは反射法データ (例えば Alkhalifah, 1997, Takanashi and Tsvankin, 2012) を用いて解析される。TTIに対応したトモグラフィックインバージョンによる異方性パラメータ推定法も提案されている。例えば Zhou, C. *et al.* (2011) は、TTI媒質における反射波走時の情報を基に、P波速度と異方性パラメータを同時に推定する方法を示した。

5.3 アングル領域 (Angle domain)

解釈などで利用されるマイグレーションイメージは空間三次元 (x, y, z) への出力結果であるが、MVA解析では速度と関連するパラメータについて次元を増やしたイメージギャザー出力が利用される。CIG (Common Image Gather) は共通オフセット領域にマイグレーション結果を出力したもので、従来はキルヒホッフ・マイグレーションが多く使用されてきた。しかしながら、地表の座標 (発振点・受振点, CMP・オフセット / アジマス) に基づくギャザーでは、マルチパスに起因する偽像の生成が問題となっていた。この問題に対して、地下のイメージングポイントにおける反射角やOpening Angleといった角度を用いたAngle Domainに基づくギャザーを使用する解決法が登場している。アングルギャザーの作成手法には、波線ベースの手法によるもの (例えば Koren *et al.* (2002)) や、WEMを用いるもの (例えば Xu *et al.* 2011; Zhou, Z. *et al.*, 2011) な

どが提案されている。

5.4 速度モデル構築ワークフロー

複雑な形状を伴う岩塩層を含んだ速度モデルの構築は、“Flooding” と呼ぶ手法を用いて段階的に行われている (Jones, 2010)。基本的なワークフローは以下である：

- (1) 堆積層速度のみが記述された初期モデル (Sediment flooding) を使用したイメージギャザーを作成し、これを用いたMVAにより1回目の速度更新を行う。これにより岩塩層を含まない区間ならびに岩塩層上位の堆積層速度とともに、岩塩層上面の形状が正確に求められる。
- (2) PSDM イメージ上で岩塩層上面のホライゾンピックアップを行い、解釈された岩塩層上面ホライゾンから下位の速度モデルを岩塩層速度で置き換える (salt flooding)。この速度モデルを使用したイメージギャザーを作成し、これを用いたMVAにより2回目の速度更新を行う。これにより岩塩層の側面および底部のイメージが改善する。
- (3) PSDM イメージ上で岩塩境界面のホライゾンピックアップを行い、岩塩層の下位を堆積層速度で埋め立てる。この速度モデルを使用したイメージギャザーを作成し、これを用いたMVAにより3回目の速度更新を行う。これにより岩塩層の下位の堆積層のイメージが改善する。この際に岩塩速度を更新しない設定とする場合が多いが、Dirty Salt が想定される地域では岩塩層内部の速度更新を目的とするMVAが実施される場合がある。

5.5 FWI

RTMはmulti-pathやtwo-way propagationに対応した高精度なイメージング手法である反面、速度モデルの誤差に対して敏感である。RTMによる精度の高いイメージを得るため、高精度・高分解能の物性値分布を得ることができるFull Waveform Inversion (FWI) に熱い注目が集まっている。FWIは観測された受振波形データや振幅、後続波などの波形情報をすべて用いてインバージョンを行い、地下の物性値分布を求める手法である。FWIではある物理モデルを初期モデルとして与え、それに対しての理論波形を計算する。得られた波形と観測波形を比較し、その差が

課題は果されたのか？

- ・ メキシコ湾における大水深・大深度サブソルトへの挑戦が原動力となり、数々の技術革新が生まれていた。
 - － 海上ストリーマー調査におけるシャドーゾーンの課題
 - ・ 多船式のWAZ/RAZにより大幅に改善
 - ・ Ultra-long offset & Full azimuth 化が現在進行中
 - － マイグレーション処理の精度の課題
 - ・ RTM普及の兆し
 - ・ 波線ベースの手法 (Beam Migration) の品質向上
 - ・ 異方性対応が進展中
 - － 速度モデルの精度の課題
 - ・ 空間解像度の向上
 - ・ FloodingによるMVAワークフローの確立
 - ・ 電磁探査との統合解析
 - － 岩塩内部の不均質構造の課題
 - ・ FWIが実用段階へ

図5 サブソルト地震探査の現況と将来

小さくなるように物理モデルを修正していくことで、地下の物性値分布を得ることができる。FWIには精度の高い初期モデルを与える必要があり、MVAに引き続き適用される場合が多い。FWIにおいても5.4節で示したようなワークフローにより速度モデルを構築する方法がVigh (2012)により紹介されている。

FWIは1980年代より盛んに研究が行われてきたが、石油開発フィールドスケールの解析には膨大な計算機能力が必要とされるため、永らく実用性が伴わなかった。しかしながら近年になってさまざまな3Dの実データへの適用や成功例も報告されるようになってきている(Plessix, 2010; Sirgue *et al.*, 2009; Vigh *et al.*, 2010; など)。そしてFWIの成功例の増加には、近年のデータ取得におけるFull azimuth & Long offset化が大きく寄与している。現在、FWIはモデリングを音響場に限定し、周波数成分も10 Hz以下程度に制限することで実用性を獲得している。将来的には計算機性能の向上により、より高い周波数成分や弾性場を利用することによって、さらなる高精度・高分解能化が実現されることが期待されている。

5.6 異種物理探査データとの統合解析

サブソルト探鉱では、トラップの形成と関連する異地性岩塩層の底面の形状や原地性岩塩層との間に根を持つかどうかなどの地質状況の把握が重要である。しかしながら地震探査単独では岩塩層底面の形状把握は一般に困難を伴う。異種物理探査データとの統合解析は、地震探査と相互補完関係にある物理探査手法を組み合わせることにより、地下のモデル推定精度を高めようとするものである。サブソルト探鉱では地震探査と電磁探査の組み合わせなどが試みられている。岩塩層は一般に高比抵抗であり、電磁波の減衰が小さいため、電磁探査では岩塩層を周囲の堆積層と良く区別できる可能性がある。ただし電磁探査法の分解能は地震探査法よりも低く、電磁探査単独では詳細情報を得ることは難しいという問題がある。

地震探査と電磁探査の統合手法には、岩石物理学的な関係（例えば、流体の飽和率、孔隙率）を用いて理論的に速度と比抵抗を関連付ける方法（Harris and MacGregor, 2006）や、さまざまな位置・深度で取得された検層データを用いて速度と比抵抗の関係を構造と関連付ける方法（例えばColombo *et al.*, 2010）などがある。異なる物理量を関連付けるために導入される岩石物理や経験式の妥当性や、それぞれ手法の欠点の影響をどの様に回避するかなど、課題も多く残されている。

6. ま と め

メキシコ湾において高い炭化水素ポテンシャルを有する未探鉱エリアとして注目されていたのが大水深・大深度域のサブソルトであった。この海域は水深が2,000～3,000 mに及ぶ深海であり、探鉱深度は10,000 m bmsl以上にも及んでいた。探鉱上最も難しい対象の1つであろうサブソルトの3-way構造にも果敢なチャレンジがなされており、地質リスクを低減させるため地震探査に対してはサブソルト

イメージングのさらなる高精度化が要求されていた。

サブソルト貯留層の把握のため、地震探査においてはさまざまな革新的技術が投入されていた。それらをまとめると図5になる。

地震探査データ取得では、震源および受振点の広帯域化技術により2.5 Hz付近からの有効なデータが取得されているうえ、取得データのFull azimuth & Long offset化が進みサブソルト貯留層に対しての地震波イルミネーションが大幅に改善され、データ品質が格段に向上している。

さらにデータ処理においては、高精度イメージング手法であるRTMが普及の兆しを見せている。かつては大きな問題として捉えていなかったメキシコ湾の速度異方性についても、近年はTTIモデルを用いて厳密に補正がなされている。速度モデル推定においてはFWIが実用段階に入ってきたことで、高品質データと高精度イメージング技術を活かしきることのできる高精度・高分解能速度モデルの獲得が実現されつつある。

地震探査によるサブソルト貯留層把握には大幅な改善が見られるものの、やはり困難な対象である岩塩層の克服に向けて、電磁探査などの異種物理探査データとの統合解析というアプローチにも関心が寄せられている。

謝 辞

本稿は(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構が実施した平成24年度技術動向調査「サブバサルト/サブソルトの貯留層把握技術」の資料のほか、石油資源開発株式会社の赤間健一氏および株式会社地球科学総合研究所の白石和也、三浦卓也の両氏がまとめた調査資料を参考にした。ご支援頂いた関係者の皆様に対し、記してここに謝意を表する。

引 用 文 献

- Alkhalifah, T., 1997: Velocity analysis using nonhyperbolic moveout in transversely isotropic media. *Geophysics*, **62**, 1839–1854.
- Alkhalifah, T. and Tsvankin, I., 1995: Velocity analysis for transversely isotropic media. *Geophysics*, **60**, 1550–1566.
- Barley, B. and Summers, T., 2007: Multi-azimuth and wide-azimuth seismic: Shallow to deep water, exploration to production. *The Leading Edge*, 450–458.
- Brice, T., 2011: Designing, acquiring and processing a multivessel coil survey in the Gulf of Mexico. *81st SEG annual meeting*, 92–96.
- Buia, M., Flores, P. E., Hill, D., Palmer, E., Ross, R., Walker, R., Houbiers, M., Thompson, M., Laura, S., Menlikli, C., Moldoveanu, N. and Snyder, E., 2008: Shooting Seismic Surveys in Circles. *Oilfield Review*: Autumn, 18–31.
- Campbell, S., Pramik, B. and Cafarelli, B., 2002: Comparative sub-salt illumination analysis. *EAGE* 64, Z-99.
- CGG, “Innovative Illumination with ‘Next-Generation’ Subsalt Imaging Solution”.<http://www.cgg.com/default>.

- aspx?cid=5569&lang=1. (accessed August 24, 2013).
- Colombo, D., M. Mantovani, M. Sfolciaghi, P. van Mastriqt, A. Al-Dulaijan, and T. Nafie, 2010 : Near surface solutions in South Rub Al-Khali, Saudi Arabia applying seismic-gravity joint inversion and redatuming. *First Break*, **28**, 77–84.
- Espinoza, C., Dragoset, B. and Curtin, N. , 2011 : Multiple attenuation challenges for a multivessel coil survey, *81th SEG annual meeting*, 3500–3504.
- Fossen H., 2010 : *Structural geology*, Chap.19 salt tectonics, Cambridge University Press.
- Fromyr, E., James, C. and Dhelie, P. E., 2008 : Crystal – A Wide Azimuth Towed Streamer Program – Acquisition Design Analysis. *EAGE* 70, G010.
- 船木弥和子, 2011 : プレソルトの探鉱・開発に賭ける Petrobras : 新 5 ヶ年計画, 2011-2015 : JOGMEC. 石油・天然ガス資源情報, 2011/8/12.
- Grechka, V., 2009 : Applications of seismic anisotropy in the oil and gas industry. *EAGE*.
- Grechka, V. and Mateeva, A. , 2007 : Inversion of P-wave VSP data for local anisotropy: Theory and case study. *Geophysics*, **72**, D69–D79.
- Harris, P. and MacGregor, L., 2006 : Determination of reservoir properties from the integration of CSEM, seismic, and well-log data. *First Break*, **24**, 53–59.
- Hill, D., Thompson, M. and Houbiers, M., 2009 : Coil-pattern shooting offers step change for cost-effective FAZ imaging, *World Oil*, September, 29–35.
- Howard, M., 2007a : Marine seismic surveys with enhanced azimuth coverage : Lessons in survey design and acquisition. *The Leading Edge*, 480–493.
- Howard, M., Harding, C. and Stoughton, D., 2007b : Rich azimuth marine seismic, a cost effective approach to better subsalt images. *First Break*, **25**, 63–68.
- Hudec, M.R. and Jackson, M.P.A., 2007 : Terra infirma: Understanding salt tectonics. *Earth-Science Review*, **82**, 1–28.
- 伊原 賢, 2009 : 米国領メキシコ湾における大水深石油開発の動向. プリーフィング資料, 2009/9/18.
- Jones, I. , 2010 : An introduction to velocity model building. *EAGE publication*.
- Ji, S., Huang, T., Fu, K. and Li, Z. , 2011 : Dirty salt velocity inversion: The road to a clear subsalt image. *Geophysics*, **76**, WB169-WB174.
- Kapoor, S. J., Egan, M., O'Briain, M., Desta, D., Atakishiyev, I., Tomida, M. and Stewart, L., 2007 : Subsalt Imaging : The RAZ-WAZ experience. *The Leading Edge*, 1414–1422.
- Keggins, J., Benson, M., Rietveld, W. , Manning, T., Cook, P. and Page, C., 2007 : Multi-Azimuth 3D provides robust improvements in Nile Delta seismic imaging. *First Break*, **25**, 47–53.
- Koren, Z., Sheng, X. and Kosloff, D., 2002 : Target-oriented common reflection angle migration. *72nd SEG Annual International Meeting Expanded Abstracts*, 1196–1199.
- Landro, M., Puigdefabregas, C. and Artsen, B., 2011 : Anisotropy in the salt outcrop at Cardona, Catalonia – implications for seismic imaging. *First Break*, **29**, 41–45.
- Leveille, J.P., Jones, I.F., Zhou, Z-Z., Wang, B. and Liu F. , 2011 : Subsalt imaging for exploration, production, and development: A review. *Geophysics*, **76**, WB3-WB20.
- Long, A., 2006 : How multi-azimuth and wide-azimuth seismic compare. *First Break*, **24**, 55–61.
- McMechan, G. A., 1983 : Migration by extrapolation of time-dependent boundary values. *Geophysical Prospecting*, **31**, 413–420.
- Michell, S., Sharp, J. and Chergotis, D, 2007 : Dual-azimuth versus wide-azimuth technology as applied in subsalt imaging of Mad Dog Field – a case study. *The Leading Edge*, **26** (4), 470–478.
- Mitchell, S., E. Shoshitaishvili, D. Chergotis, J. Sharp and J. Etgen, 2006 : Wide azimuth streamer imaging of Mad Dog: Have we solved the subsalt imaging problem?. *76th Ann. Internat. Mtg., SEG, Expanded Abstracts*, 2905–2909.
- Moldoveanu, M. and Kapoor, J., 2008 : Patterns of progress, *E & P*, pp.3.
- Moldoveanu, M. and Quigley, J., 2011 : Random Sampling for Seismic Acquisition. *EAGE* 73, H026.
- Mothi, S., Schwarz K. and Zho, H., 2013 : Impact of Full - Azimuth and Long - offset Acquisition on Full Waveform Inversion in Deep Water Gulf of Mexico. *75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013*, 10.3997/2214-4609.20130826.
- 新部貴夫, 青木直史, 高 梨将, 2014 : サブバサル貯留層把握に寄与する地震探査の技術革新. 石技誌, **79** (1) 71–78.
- O'Connell, J. K., Kohli, M. and Amos, S. , 1993 : Bullwinkle: A unique 3-D experiment. *Geophysics*, **58**, 167–176.
- Plessix, R.E., Baeten, G., deMaag, J.W., Klaasen, M., Rujie, Z. and Zhifei, T. , 2010 : Application of acoustic full waveform inversion to a low-frequency large-offset land data set. *80th SEG Annual International Meeting Expanded Abstracts*, 930–934.
- Ray, A. and Chen, R., 2004 : Importance of ray-trace modeling in the discovery of Thunder Horse North Field, Gulf of Mexico. *The Leading Edge*, 68–70.
- Reksnes, P., Haugane, E. and Hegna, S., 2002 : How PGS created a new image for the Varg field. *First Break*, **20**, 773–777.
- 佐藤 隆一, 2007 : メキシコ湾大水深の古第三系石油開発に道を拓く～超大水深・大深度掘削のジャック 2 号井成功のインパクト～. 石油・天然ガスレビュー, **41** (1).
- Sirgue, L., Barkel, O.I., van Gestel, J.P., Askim, O.J. and Kommendal, J.H., 2009 : 3D waveform inversion in Valhall

- wide-azimuth OBC. *71st EAGE Conference and Exhibition*, U038.
- Takanashi, M. and Tsvankin, I., 2012 : Moveout analysis of wide-azimuth data in the presence of lateral velocity variation. *Geophysics*, **77**, U49 – U62.
- 竹原 美佳, 2012 : 中小独立系が塗り替えるサブサハラの産油ガス地図. JOGMEC, 石油・天然ガスレビュー, **46**(4), 31–52.
- Thomsen, L., 1986 : Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, **51**, 1954–1966.
- Tsvankin, I. and Thomsen, L., 1994 : Nonhyperbolic reflection moveout in anisotropic media. *Geophysics*, **59**, 1290–1304.
- Tsvankin, I., Gaiser, J., Grechka, V., van der Baan, M. and Thomsen T., 2010 : Seismic anisotropy in exploration and reservoir characterization: An overview. *Geophysics*, **75**, 75A15–75A29.
- Vigh, D., 2012 : Full-waveform inversion aided depth imaging. *74th EAGE Conference & Exhibition*.
- Vigh, D., Starr, B., Kapoor, J. and Li, H., 2010 : 3D full waveform inversion on a GOM data set. *80th SEG Annual International Meeting Expanded Abstracts*, 957–961.
- Vinje, V., Roberts, G. and Taylor, R, 2008 : Controlled beam migration: a versatile structural imaging tool. *First Break*, **26**, 9, 109–113.
- Woodward, M. J., Nichols, D., Zdraveva, O., Whitfield, P. and Johns, T., 2008 : A decade of tomography. *Geophysics*, **73**(5), p.VE5–VE11.
- Xu, S., Zhang, Y. and Tang, B., 2011 : 3D angle gathers from reverse time migration. *Geophysics*, **76**, S77–S92.
- Zhou, C., Jiao, J., Lin, S., Sherwood, J. and Brandsberg-Dahl, S., 2011 : Multiparameter joint tomography for TTI model building. *Geophysics*, **76**, WB183–WB190.
- Zhou, Z., Howard, M. and Mifflin, C., 2011 : Use of RTM full 3D subsurface angle gathers for subsalt velocity update and image optimization: Case study at Shenzi field. *Geophysics*, **76**, WB27–WB39.